

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫПАРНОЙ УСТАНОВКИ ВОДООЧИСТНОГО КОМПЛЕКСА

Ю.Б. Ананьин, А.А. Сидорова  
Томский политехнический университет  
E-mail: Yba1@tpu.ru

## Введение

Выпарные установки давно используются в химических областях для очищения воды от загрязненных субстанций. Основная функция таких установок – нагревание смеси до температуры кипения воды и последующее разделение водяного пара от примесей, оставшихся в осадке. В данной работе проведено моделирование системы с пониженным давлением, для уменьшения точки кипения воды.

## Вакуумный выпариватель

Выпаривание – процесс, заключающийся в частичном удалении растворителя путем его испарения при кипении [1].

Важно отметить, что при вакуумном выпаривании не используется химия, таким образом, использование выпаривателя не наносит вред окружающей среде. Вакуумный выпариватель работает в автоматическом непрерывном режиме и не требует специального обслуживания. Для осуществления процесса выпаривания необходимо теплоту от теплоносителя передать кипящему раствору, что возможно лишь при наличии разности температур между ними (так называемая полезная разность температур) [1].

Для вакуумного выпарного аппарата была разработана система контроля уровня. Схема представлена на рисунке 1.

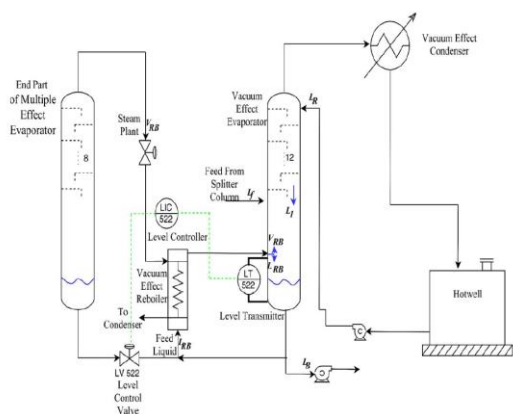


Рис. 1. Функциональная схема системы выпарной установки

## Математическая модель

Математическая модель вакуумного выпаривателя предполагает равновесие масс, поскольку его форма напоминает ректификационную колонну. Так же моделирование лотка проводится путем его принятия как модели ректификационной колонны [2].

Динамические и численные модели выпаривателя для контроля скорости потока и уровня изучены в [3,4]. Условные обозначения мат. модели приводятся в таблице 1.

Таблица 1.

Обозначение переменной	Пояснение	СИ
$M_B$	Масса жидкости в выпаривателе	кг
$L_1$	Жидкость из первого лотка	кг/с
$L_f$	Подача жидкости из разделительной колонны	кг/с
$L_{RB}$	Разделенная жидкость	кг/с
$V_{RB}$	Разделенный пар	кг/с
$L_B$	Жидкость нижнего продукта	кг/с
$\rho$	Плотность	кг/м <sup>3</sup>
$A$	Площадь поперечного сечения	м <sup>2</sup>
$m$	Массовый расход	м <sup>3</sup> /с
$\lambda_{ST}$	Скрытый тепловой пар	кДж/кг
$\lambda_p$	Скрытое тепло технологической жидкости	кДж/кг
$C_v$	Коэффициент клапана	-
$C_d$	Коэффициент выгрузки	-
$h_b$	Уровень жидкости в базе (текущий)	м
$u(s)$	Сигнал	-

Форма математического уравнения массового равновесия с параметрами, указанными в таблице 1, определяется как:

$$\frac{dM_B}{dt} = L_1 + L_f + L_{RB} - V_{RB} - L_B, \quad (1)$$

$$\rho_B A \frac{dh_B(t)}{dt} = \rho_1 \dot{m}_1(t) + \rho_{RB} \dot{m}_{RB}(t) + \rho_f \dot{m}_f(t) - \frac{\lambda_{ST}}{\lambda_p} \dot{m}_s(t) - \rho_B \dot{m}_B(t). \quad (2)$$

Согласно теории расхода, скорость оттока определяется как:

$$\dot{m}_B(t) = C_V C_d A_{pipe} \sqrt{2gh_B(t)}. \quad (3)$$

Подставим уравнение (3) в (2) и получим (4):

$$\rho_B A \frac{dh_B(t)}{dt} = \rho_l \dot{m}_l(t) + \rho_f \dot{m}_f(t) + \rho_{RB} \dot{m}_{RB}(t) - \frac{\lambda_{ST}}{\lambda_p} \dot{m}_s(t) - 0,01889 \rho_B \sqrt{h_B(t)}. \quad (4)$$

Необходимо линеаризовать уравнение (4) по Тейлору:

$$\begin{aligned} f[\dot{m}_B, h_B] &= 0, \\ \dot{h}_B &= f(\bar{\dot{m}}_B, \bar{h}_B) + \frac{\delta f}{\delta h_{B_{\bar{h}_B}}} (h_B - \bar{h}_B) + \\ &+ \frac{\delta f}{\delta \dot{m}_{\bar{m}_{in} = \bar{m}_{in}}} (\dot{m}_{in} - \bar{\dot{m}}_{in}), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\bar{\dot{m}} = \rho_l \dot{m}_l(t) + \rho_f \dot{m}_f(t) + \rho_{RB} \dot{m}_{RB}(t) - \frac{\lambda_{ST}}{\lambda_p} \dot{m}_s(t) \quad (6)$$

Переведем в Лапласово изображение:

$$\begin{aligned} h_B(s) &= \frac{\rho_l \dot{m}_l(s)}{\rho_B A s} + \frac{\rho_{RB} \dot{m}_{RB}(s)}{\rho_B A s} + \frac{\rho_f \dot{m}_f(s)}{\rho_B A s} - \\ &- \frac{\lambda_{ST}}{\lambda_p} \frac{\dot{m}_s(s)}{\rho_B A s} - \frac{0,01889 h_B(s)}{\rho_B A s}. \end{aligned} \quad (7)$$

Подставим численные значения и получим:

$$\begin{aligned} h_B(s) &= \frac{53,58}{454,54s+1} \dot{m}_f(s) + \\ &+ \frac{32,6818}{454,54s+1} \dot{m}_{RB}(s) - \frac{0,0909}{454,54s+1} \dot{m}_s(s). \end{aligned} \quad (8)$$

Дополнительно к модели выпаривателя, имеем следующую передаточную функцию для привода клапана контроля уровня.

$$\frac{\dot{m}_{RB}(s)}{u(s)} = \frac{5,4248 \cdot 10^{-4}}{7,555 \cdot 10^{-4} s + 1}. \quad (9)$$

## Моделирование и анализ данных

Операторно-структурная схема системы вакуумного выпарного аппарата представлена на рис. 2.

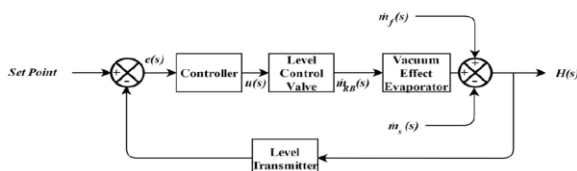


Рис. 2. Операторно-структурная схема

Моделирование системы проведено в пакете Simulink Matlab 2019a. На основании операторно-структурной схемы составлена модель вакуумного выпарного аппарата. В качестве входного

воздействия сформирован единичный ступенчатый сигнал.

Исходя из графика на рис. 3, время переходного процесса равно приблизительно 45 секунд, перерегулирование отсутствует.

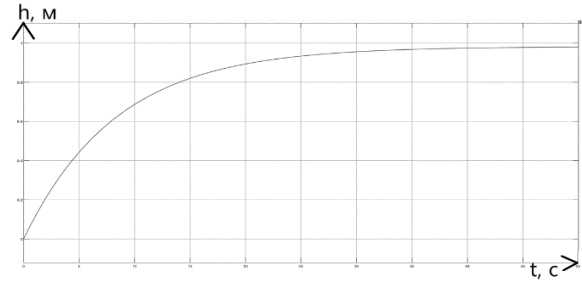


Рис. 3. График переходного процесса на выходе модели

Из рис. 3 видно, что график имеет форму апериодического звена, обладает большим запасом устойчивости и малой статической ошибкой.

## Заключение

Таким образом, проведено математическое моделирование вакуумного выпаривателя, разработана операторно-структурная схема системы управления выпаривателем и определены показатели качества. Модель оказалась устойчивой и может быть применена для дальнейших исследований, разработки системы управления вакуумным выпаривателем, контролирующей уровень вещества.

## Список использованных источников

1. Дытнерский, Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии [Текст]: учебник для вузов: в 2-х кн. Ч. 1. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты / Ю. И. Дытнерский. – 2-е изд. – М.: Химия, 1995. – 400 с.
2. Indriawati, K., Amarto, F. B., “Fault Tolerant Control System Design for Vacuum Effect Evaporator Plant with Sensor and Actuator Fault”. 5th International Conference on Instrumentation, Control and Automation (ICA), 2017. – 217 – 222 с.
3. K.M. Kam, P. Saha, M.O. Tade, G.P. Rangaiah. Models of an industrial evaporator system for education and research in process control, Dev. Chem. Eng. Mineral Process. 10, 2001. – 105 – 127 с.
4. K. Indriawati, N. Sebe, T. Agustinah, and A. Jazidie. “Robust Fuzzy Observer-based fault tolerant tracking control systems with simultaneous actuator and sensor faults: application to a dc series motor speed drive,” International Review of Automatic Control (I.R.E.A.CO.), Vol. 8, N. 6, November 2015. – 221 – 223 с.